УДК 621. 325, 592 (575.2) (04)
DOI 10.58649/1694-9099-2026-2-549-555

КАДЫШЕВ С.
Жусуп Баласагын атындагы КУУ
КАДЫШЕВ С.
КНУ имени Жусупа Баласагына
S. KADYSHEV
KNU Jusup Balasagyn

PbTe:Mn ЖАНА $Pb_{1-x}Ge_xTe$:Mn ЖАРЫМ ӨТКӨРГҮЧТӨРҮНҮН ЭЛЕКТРДИК ЖАНА МАГНИТТИК КАСИЕТТЕРИНИН ИК - ЛАЗЕР НУРУНУН ТААСИРИНДЕ ӨЗГӨРҮҮЛӨРҮНҮН ӨЗГӨЧӨЛҮКТӨРҮ

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ PbTe:Mn И $Pb_{1-x}Ge_xTe$:Mn ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИК -ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

FEATURES OF CHANGES IN ELECTRICAL AND MAGNETIC PROPERTIES IN SEMICONDUCTORS PbTe:Mn AND $Pb_{1-x}Ge_xTe$:Mn UNDER THE INFLUENCE OF IR LASER RADIATION

Кыскача мүнөздөмө: PbTe:Mn жана $Pb_{1-x}Ge_xTe$:Mn жарым өткөргүчтөрүнүн электрдик касиеттери жана электрондук парамагниттик резонансы (ЭПР) матрицанын тунук аймагында ($\hbar\omega < Eg$) ИК лазердик нур менен нурдантууга чейин жана нурдантуудан кийин изилденген. PbTe:Mn кристаллдарынан айырмаланып, $Pb_{1-x}Ge_xTe$:Mn (x=0,03) кристаллдарында өткөрүмдүүлүк инверсиясынан кийин электрондордун концентрациясы төмөндөп, анын салыштырма электрдик каршылыгынын ρ(T) температуралык көз карандылыгынын 4,2°K < T< 30°K аймагында, б.а. T = 29°K температурада кескин минимумга ээ болгон абал пайда болуп, ошол эле температурада ЭПР спектринин бурчтук көз карандылыгы байкалат.

Аннотация: Исследованы электрические свойства и электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) кристаллов полупроводников PbTe:Mn и $Pb_{1-x}Ge_xTe$:Mn до и после обработки ИК-лазерным излучением в области прозрачности матрицы ($\hbar\omega < Eg$). В отличие от кристаллов PbTe:Mn, в кристаллах $Pb_{1-x}Ge_xTe$:Mn (x = 0,03) после инверсии проводимости концентрация электронов уменьшается, а температурная зависимость их удельного сопротивления ρ(T) имеет резкий минимум в области 4,2°K < T < 30°K, т.е. при T = 29°K и при этой же температуре наблюдается угловая зависимость спектра ЭПР.

Abstract: Electrical properties and electron spin resonance (ESR) of the PbTe:Mn and $Pb_{1-x}Ge_xTe$:Mn semiconductors before and after IR laser emission treatment in the matrix transparency region ($\hbar\omega < E_g$) have been studied. In contrast to PbTe:Mn crystals, in $Pb_{1-x}Ge_xTe$:Mn (x = 0.03) crystals, after the inversion of conductivity, the concentration of electrons decreases, and the temperature dependence of their resistivity ρ(T) has a sharp minimum in the region of 4.2°K < T < 30°K, i.e. at T = 29°K and at this or that temperature, an angular dependence of the EPR spectrum is observed.

Негизги сөздөр: жарым өткөргүчтөр; коргошун халькогениддери; кошулмалар, электрондук парамагниттик резонанс; ИК - лазердик нурлануу; фотондун энергиясы; концентрация; температура диапазону; заряд ташуучулар; спин гамильтонианы.

Ключевые слова: полупроводники; халькогениды свинца; соединения, электронный парамагнитный резонанс; ИК-лазерное излучение; энергия фотонов; концентрация; температурный диапазон; носители заряда; спин гамильтониан.

Keywords: semiconductors; lead chalcogenides; compounds; electron paramagnetic resonance; IR laser radiation; photon energy; concentration; temperature range; charge carriers; spin Hamiltonian.

Киришүү. Коргошундун халькогениддери (A^4B^6), деп аталган (PbTe, PbSe, PbS – кууш тилкелүү жарым өткөргүчтөрү) жана алардын катуу эритмелери ($Pb_{1-x}Sn_xTe$, $Pb_{1-x}Sn_xSe$, $Pb_{1-x}Sn_xS$, Pb_{1-x} Ge_xTe,, Pb_{1-x} Ge_xSe,, Pb_{1-x} Ge_xS) инфракызыл оптолекрониканын негизги материалдарынан болуп эсептелет. Бул жарым өткөргүчтөрдүн кызыктуу өзгөчөлүктөрүнүн бири - тыюу салынган тилкесинин эритменин курамынан көз карандылыгы жана алардагы кошулма жана кемчилик абалдарынын көйгөйү азыркы учурда бул материалдарды практикалык колдонуу көз карашынан алганда эң маанилүү болуп саналат.

A^4B^6 жарым өткөргүчтөрүнүн касиеттерине ар кандай кошулмалар менен торчонун кемчиликтеринин таасири боюнча көптөгөн эксперименталдык жыйынтыктар көпчүлүк кошулма абалдарын локалдашкан абал моделинин алкагында түшүндүрүүгө болоору көрсөтүлгөн [1]. Бул абалдарды тилке аралыгында, өткөрүмдүүлүк же валенттүүлүк тилкесинде "терең жайгашкан абалдар" катары кароого болот.

Аталган [2; 4] макалаларда CO_2 -лазер нурунун таасирин коргошун халькогениддеринин технологиясында колдонуу, өздүк жана кошулма дефектердин ИК-лазер нурунун таасиринде заряддык абалдарынын өзгөрүүлөрү изилденген.

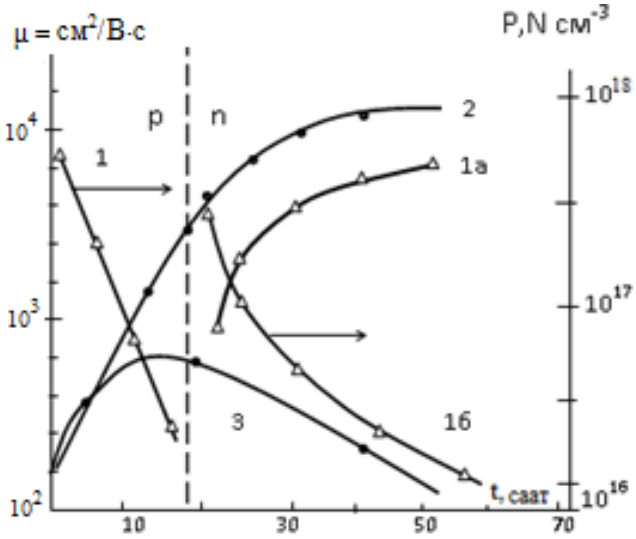
Кошулма борборлордун түзүлүшүн, алардын заряддык жана торчодогу абалын, комплекстештирүү механизмдерин жана торчонун кемчиликтерин аныктоочу эксперименттерде электрондук парамагниттик резонанс (ЭПР) ыкмасы эң жогорку тактыкты камсыз кылуучу ыкма болуп эсептелет [5; 6]. ЭПР спектрлеринин интенсивдүүлүгүн изилдөө парамагниттик борборлордун концентрациясын аныктоого жана спектрлердин бурчтук көз карандылыктарын байкоо кристаллдык торчодогу магниттик жактан эквиваленттүү эмес борборлордун санын жана борбордун айланасындагы атомдор менен өз ара аракеттешүүсүн аныктоого мүмкүндүк берет. Бул маалыматты, эгерде электрон спинининайланадагы ядролордун спиндери менен, ошондой эле ядронун өзү менен өз ара аракеттенүүсүнөн келип чыккан чечилген өтө так структурасы (HFS) байкалган ЭПР спектрлерин талдоодон алса болот. Бул жагынан алганда, коргошун халькогениддеринин жана алардын катуу эритмелеринин торчолорундагы парамагниттик кошулмалардын жүрүм-турумун изилдөө өзгөчө кызыгууну жаратат, анткени торчодогу магниттик иондордун таралышы жана абалы бул кристаллдардын электрдик жана магниттик касиеттерин аныктайт.

Башка жагынан алганда, ИК - лазердик нурлануунун жарым өткөргүч материалдар менен өз ара аракеттенүүсү илимий кызыгууну жаратат. Лазердик нурлануунун жарым өткөргүчтөр менен өз ара аракеттенүүсүн изилдөө башында $\hbar\omega > E_g$ спектрдик диапазонунда жүргүзүлгөн (мында E_g - тыюу салынган тилкенин энергиясы жана $\hbar\omega$ - фотондун энергиясы). Бул өз ара аракеттенишүү эффективдүү тыюу салынган тилкенин нурлануусу менен чектелген жакын беттик катмарлардын физикалык касиеттеринин өзгөрүүсүнө алып келет [7].

Бир катар [8; 11] эмгектерде матрицасынын тунуктук аймагынан лазердик нурдантуунун тар тилкелүү катуу эритмелердин $Pb_{1-x}Sn_xSe$ (Te) электрдик касиеттерине тийгизген таасири изилденген. Көлөмдүк электрдик жана оптикалык касиеттердеги өзгөрүүлөр байкалган. Бул, биринчи кезекте, мындай кошулмалардын кристаллдарынын матрицасындагы кошулмалардын ысышы менен түшүндүрүлөт жана металл атомдорунун диффузиясы менен коштолот, натыйжада $Pb_{1-x}Sn_xSe$ (Te) кристаллдарынын металлдык субторчолорундагы электроактивдүү бош орундар толтурулат.

Сунушталган макалада кристаллдык матрицанын тунуктук аймагынан лазердик нурдантуунун таасири астында марганец (Mn) менен легирленген коргошун теллуридинин жана алардын катуу эритмелеринин электрдик касиеттеринин жана ЭПР спектрлеринин лазер нуру менен стимулдаштырылган трансформациясынын эксперименталдык изилдөөсүнүн жыйынтыктары келтирилген.

1. Үлгүлөр жана алардын электрдик касиеттерин изилдөө. PbTe:Mn монокристаллы Чохральский ыкмасы жана эритмеден багыттуу кристаллдашуу менен, ал эми Pb1-xGexTe:Mn (x = 0,03) катуу эритмелери Бриджмен ыкмасы менен өстүрүлгөн. Марганец кошулмасы эритмеге MnTe кошулма катары киргизилип, эритмедеги кошулманын концентрациясы NMn = 0,5ат.% түзөт. Кристаллдар p-типтеги өткөрүмдүүлүккө ээ болуп, суюк азоттун температурасында Холл концентрациясы $P_{77} \approx (0,1 \div 3)\cdot 10^{18}$ $см^{-3}$ түзөт. Үлгүлөр куймадан (7,0×2,0×1,0) $мм^3$ өлчөмүндө [001] багытында кесилген. Кристаллдар 300 К температурада (CO_2 -лазери) ИК-нуру менен нурдандырылган ($\hbar\omega < E_g$, λ = 10,6мкм) (Eg – PbTe:Mn, $Pb_{1-x}Ge_xTe$:Mn (x=0,03) үлгүлөрүнүн тыюу салынган тилкелеринин аралыгы). Лазер нурунун кубаттуулугунун тыгыздыгы (W) кристаллдын эриши үчүн талап кылынган босогодон төмөн тандалып, нурдантуу учурундагы үлгүнүн температурасы дефектердин жылуулук трансформацияларын пайда кылуучу температурадан төмөн болгон шарт түзүлөт.

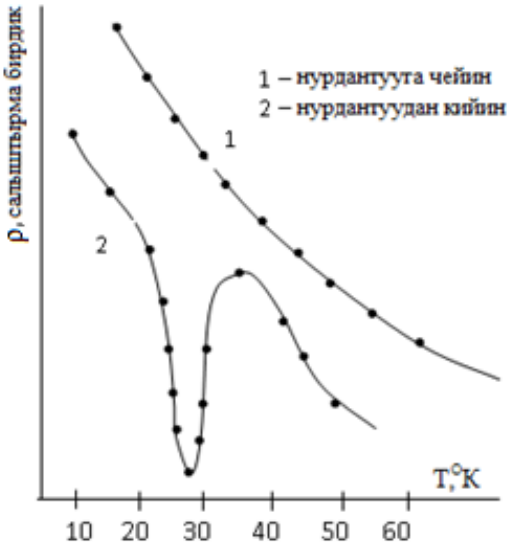


1-сүрөт. PbTe:Mn, $Pb_{1-x}Ge_xTe$:Mn (x= 0,03) жарым өткөргүчтөрүнүн заряд ташуучуларынын концентрациясынын (p, n), кыймылдуулугунун (μ) лазер нуру менен нурдантуу убактысынан (t) көз карандылыгы.

Лазер нурунун таасиринде PbTe:Mn, $Pb_{1-x}Ge_xTe$:Mn (x = 0,03) кристаллдарынын Холлдук көзөнөктөрүнүн концентрациясы төмөндөп, белгилүү убакыттан кийин p-типтеги өткөрүмдүүлүк n-типке өзгөрүп, өткөрүмдүүлүктүн инверсиясы пайда болот (1-сүрөт, 1, 1а, 1б ийри сызыктары). Инверсияга жетүү убактысы лазердин кубаттуулугунун тыгыздыгына жараша болот жана үлгүлөрдүн электрдик касиеттеринин лазер нуру менен стимулдашкан трансформациясы көлөмдүк мүнөзгө ээ, бул эркин заряд алып жүрүүчүлөрдүн концентрациясынын өзгөрүшүнө ылайык оптикалык өткөрүмдүүлүктүн өзгөрүшү менен далилденет.

PbTe:Mn кристаллдарынан айырмаланып, $Pb_{1-x}Ge_xTe$:Mn (x = 0,03) кристаллдарында өткөрүмдүүлүк инверсиясынан кийин электрондордун концентрациясы төмөндөйт (1-сүрөт, 1б ийри сызыгы) жана алардын кыймылдуулугунун (3-ийри сызык) өтө төмөндүгү ($\mu_{77}=2\cdot 10^2 см^2/В\cdot с$) байкалат, ал эми PbTe:Mn кристаллында инверсиядан кийин электрондордун кыймылдуулугу жогорулап, бул жарым өткөргүчтөр үчүн максималдуу маанилерге чейин жетет (2 - ийри сызык). Бул жыйынтыктар лазердик нурдантуу менен кристаллдык матрицанын өз ара аракеттенишүү механизми татаал жана жылуулук процесстери менен байланышы жок экендигин көрсөтүп турат.

Өткөрүмдүүлүк инверсиясынан кийин, $Pb_{1-x}Ge_xTe$:Mn (x = 0,03) кристаллдарынын салыштырма



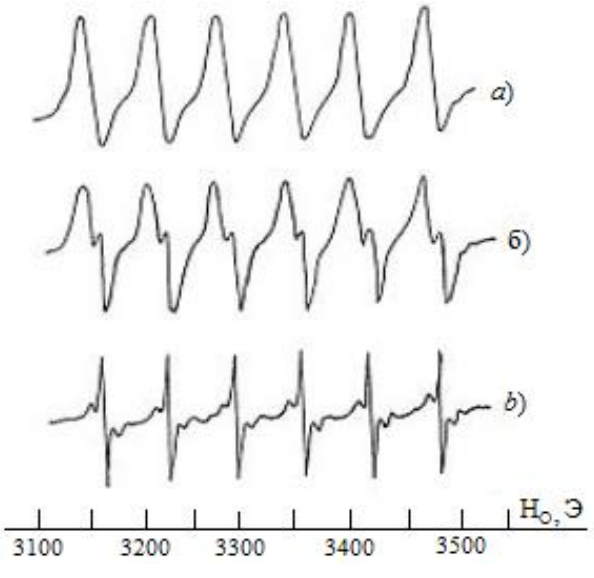
2-сүрөт. $Pb_{1-x}Ge_xTe$:Mn (x = 0,03) жарым өткөргүчүнүн салыштырма электрдик каршылыгынын ρ(T) температуранын 4,2°K < T< 30°K аймагында көз карандылыгы.

электрдик каршылыгынын ρ(T) температуралык көз карандылыгынын 4,2°K < T< 30°K аймагында, б.а. T = 29°K температурада кескин минимумга ээ болгон абал пайда болот (2- сүрөт).

V-VI кошулмаларынын монокристаллдарын өстүрүү процессиндеги концентрациялык муздатуунун натыйжасында металл жана халькоген компоненттери менен байытылган жана вакансиялык аймактардын пайда болоору белгилүү. Легирлөөдөн кийин бул аймактар моноатомдуктан төрттүк кошулмаларга чейинки ар кандай химиялык курамдарды көрсөтө алат [8; 9]. Бул бир тектүү эместиктер кристалл матрицасы менен потенциалдык тоскоолдуктарды түзөт жана алардын төмөнкү температурада көзөнөктөрдү интенсивдүү чачыратуусунун натыйжасы кыймылдуулуктун жана Холл коэффициентинин температурадан аномалдуу көз карандылыгына алып келет. Мындай тоскоолдуктардын болушу жылыш тогу жок кезинде деле кызыл чети киргизилген кошулманын түрү менен аныкталган олуттуу фоточыңалуу сигналдарынын пайда болушу менен тастыкталат. Андан тышкары, кристаллда электроактивдүү касиеттерге ээ болгон түйүндөр аралык атомдордун олуттуу концентрациясы жайгашат.

ИК-лазер нуру кристалл менен өз ара аракеттенишип, бул аймактардын диссоциациясына жана жарык толкунунун электромагниттик талаасында өздүк жана кошулма иондорунун диффузиясына алып келет. Бул процесс кристаллдардын металл субторчосундагы обочолонгон марганецтин концентрациясынын жогорулашы менен коштолот жана өз кезегинде аралашманын ЭПР сигналынын интенсивдүүлүгүн жогорулатат.

2. Электрондук парамагниттик резонанс. ЭПР спектрлерин изилдөө VARIAN-E-12 түзүмүндө 4,2^{O}Кден 300^{O}Кге чейинки температура диапазонунда, υ = 9 ГГц жыштыгында жүргүзүлдү. W = 25 Вт/см^2 кубаттуулуктагы лазердик нурдантууга дуушар болбогон PbTe:Mn жана $Pb_{1-x}Ge_xTe$:Mn (x = 0,03) кристаллдарында ЭПР спектрлери IV-VI кристаллдык торчодогу обочолонгон Mn^{2+} иондоруна мүнөздүү алты изотроптук өтө так структура (ӨТС) сызыктарынан турат. Бул сызыктар Mn^{2+} $3d^5$ электрондорунун ^{55}Mn изотопторунун ядролук моменти (I = 5/2) менен өз ара аракеттешүүсүнөн келип чыгат (3-сүрөт, а), б), b) ийри сызыктары. Спектрлердин спин гамильтонианын туракттуулуктары 1-таблицада келтирилген.



3-сүрөт. PbTe:Mn (2) монокристаллдарынын T = 20 K температурадагы: *а*) – 5 саат нурдантуудан кийин, б) – 10 саат нурдантуудан кийин, *b*) W = 25 Вт/см^2 жазылып алынган ЭПР спектрлери.

ИК-лазер нурларынын кристаллдар менен өз ара аракеттенүүсү учурунда, ЭПР спектрлериндеги обочолонгон өтө так жука сызыктардын интегралдык интенсивдүүлүгү бир кыйла жогорулайт. Андан тышкары, ЭПР спектрлеринде магнит талаасынын жогорку мааниленринде алты кошумча изотроптук өтө так жука сызыктар пайда болот (3-сүрөт, б). Нурланбаган кристаллдарда байкалган алты сызыктын ар биринин интенсивдүүлүгү башында бир аз жогорулайт, каныккандыкка жетет, андан кийин төмөндөйт. Мындай өтө так жука структуралык сызыктар n-типтеги өткөрүмдүүлүк аймагында байкалбайт. Кошумча алты өтө так жука структуралык сызыктардын интенсивдүүлүгү жогорулайт жана PbTe:Mn жана $Pb_{1-x}Ge_xTe$:Mn (x=0,03) кристаллдарынын ар бир структуралык спектрлеринин жанында сателиттер пайда болот жана өтө жука структурадан улам пайда болгон PbTe:Mn жана $Pb_{1-x}Ge_xTe$:Mn (x = 0,03) структуралык спектрлеринин жанында теллурдун (Te) ядролук моменти (спини I = 1/2) менен аракеттешүүнүн негизинде сателиттер пайда болот (3-сүрөт б), b) – ийри сызыктары, 4-сүрөт, 2) – ийри сызык).

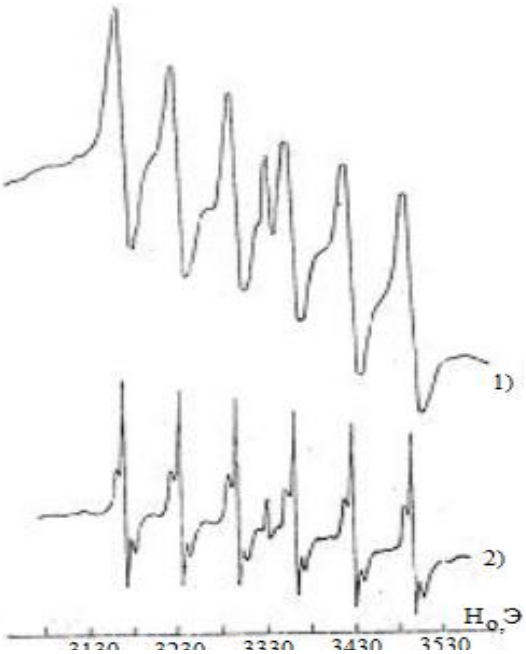
Таблица 1. Т=20^{O}К температурада изилденген үлгүлөрдүн спин – гамильтонианынын туракттуулуктары

Үлгүлөр	g - фактор		Өтө так структура тураттуулугу (ӨТСТ) А, $см^{-1}$		Супер ӨТСТ $см^{-1}$
	Нурдантууга чейин	Нурдантуудан кийин	Нурдантууга чейин	Нурдантуудан кийин	
1. PbSe:Mn [10, 11] 2. PbTe:Mn 3.$Pb_{1-x}Ge_xTe$:Mn(x=0,03)	2,0003±0,0005 2,0033±0,0005 2,0005±0,0005	1.9949±0,0005 1,9923±0,0005 1.9987±0,0005	(65,9±0,2)×10^{-4} (59,9±0,2)×10^{-4} (60,3±0,2)×10^{-4}	(66,1±0,2)×10^{-4} (59,6±0,2)×10^{-4} (60,2±0,2)×10^{-4}	– (15,4±0,2)×10^{4} (15,0±0,2)×10^{-4}

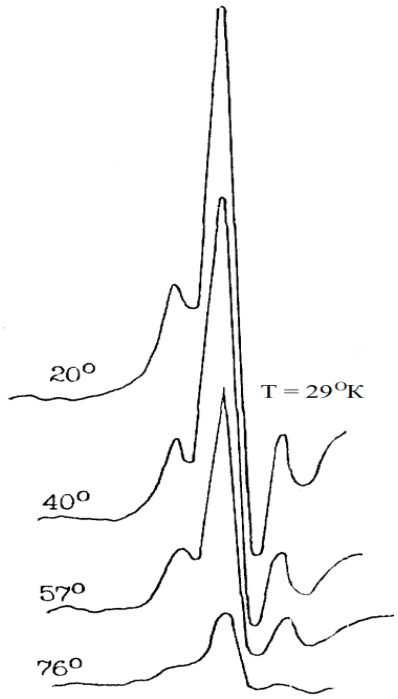
ЭПР спектрлеринин деталдуу анализи баштапкы кристаллда Mn^{2+} иондору негизинен түйүндөр аралык жана ЭПР-активдүү эмес кошулмаларда жайгашаарын көрсөтүп турат. Лазердик нурдантуудан кийин кошумча алты изотроптук сызыктын жана өтө жука структуралык сызыктардын пайда болушун нурдантуу убактысынын өсүшү менен кристаллдык торчонун түйүндөрүндөгү Mn^{2+} иондорунун концентрациясынын жогорулашы менен түшүндүрүүгө болот.

Алынган спектрлердин температуралык жана бурчтук көз карандылыктарын изилдөө көрсөткөндөй, Т = 29 К температурадагы $Pb_{1-x}Ge_xTe$:Mn (x=0,03) катуу эритмелеринде, салыштырма электрдик каршылыктын температуралык көз карандылыктарындагыдай эле, ЭПР сызыктарынын интенсивдүүлүгүнүн күчтүү бурчтук көз карандылыгы менен байланышкан өзгөчөлүк, ρ(Т) көз карандылыгынын жүрүшүн кайталаган ЭПР спектринин супер так структура сызыгынын интенсивдүүлүгүнүн бурчтук көз карандылыгы (5-сүрөт) пайда болот. Белгилей кетүүчү нерсе, мындай өзгөчөлүктөр лазер нуру менен нурдантылбаган жана нурдантылган $Pb_{1-x}Ge_xTe$:Mn (x = 0,03) кристаллдарында (р-өткөрүмдүүлүк аймагында) жана PbTe:Mn кристаллдарында р- жана n- өткөрүмдүүлүк аймактарында тең байкалбайт, б.а. алар Т = 29^{O}К температурасынын эки тарабында тең көрүнбөйт.

$Pb_{1-x}Ge_xTe:Mn$ (x = 0,03) кристаллындагы фазалык өткөөл жылышуу тибиндеги өткөөл деп эсептелет, бирок бир катар авторлор [12; 14] торчонун туруксуздугу Ge атомдорунун торчодогу туруксуздугунан келип чыгат деп эсептешет жана фазалык өтүүнү тартиптин бузулуш өткөөлү катары классификациялашат.



4-сүрөт. $Pb_{1-x}Ge_xTe:Mn(x=0,03)$ монокристаллдарынын T = 20 K температурадагы (а – 5 саат нурдантуудан кийин, б) – 10 саат нурдантуудан кийин, W = 25 Вт/см^2 жазылып алынган ЭПР спектрлери



5-сүрөт. $Pb_{1-x}Ge_xTe:Mn$ (x=0,03) монокристаллынын ЭПР сызыктарындагы T = 29K температурада бурчтук көз карандылыктары

Изилдөөлөрдүн негизинде алынган эксперименталдык жыйынтыктар кристалл менен өз ара аракеттенген лазердик нурлануу кристаллдын торчосундагы тоскоолдук аймактардын диссоциациясына жана лазер нурунун электромагниттик талаасында өздүк (Pb, Ge, Te) жана кошулма (Mn) иондорунун диффузиясына алып келээрин тастыктап, натыйжада процесс кристаллдардын металл торчосунда обочолонгон марганецтин концентрациясынын көбөйүшү менен коштолуп, кошулманын ЭПР сигналынын интенсивдүүлүгүн жогорулатаарын ырастайт. PbTe:Mn кристаллдарына салыштырмалуу n - $Pb_{1-x}Ge_xTe:Mn$ (x = 0.03) үлгүлөрүнүн электрондорунун кыймылдуулугунун төмөндүгү, салыштырма каршылыктарынын темературалык көз карандылыктарында ρ(T) жана ЭПР спектринин супер так структура сызыктарынын интенсивдүүлүгүнүн бурчтук көз карандылыктарында аномалиялардын пайда болушу (T=29°K) германий атомдорунун $Pb_{1-x}Ge_xTe:Mn$ (x = 0.03) кристаллынын торчолорунда кайра бөлүштүрүлүшү жана коргошун (Pb) менен германийдин (Ge) атомдук (иондук) радиустарынын айырмачылыгы менен байланыштуу, деп жыйынтык чыгарса болот.

PS: Эксперименталдык изилдөөлөр Украина УИАнын жарым өткөргүчтөр физикасы институтунун кванттык өлчөмдөгү структуралар лабораториясында жүргүзүлгөн.

Изилдөөлөрдүн жыйынтыгына кызыкдар болуп, илимий кеңештерин айтып, колдоо көрсөткөн институттун жетектөөчү илимий кызматкерлери: Юрий Сергеевич Громовойго жана Сергей Владимирович Пляцкого терең ыраазычылыгымды билдиремин.

Колдонулган адабияттар

1. В.И. Кайданов, Ю.И. Равич. Успехи физических наук, 145, 51 - 86 (1985).
2. Кадышев С. К вопросу использования излучения CO_2-лазера в технологии халькогенидов свинца (часть I, II). Вестник КНУ им. Ж. Баласагына, 2005, – серия 3, – вып. 3,– с. 37-43.
3. С.В. Пляцко, С. Кадышев. Примесные дефекты в соединениях A^4B^6 и их трансформация под действием ИК-лазерного излучения. Вестник КНУ им. Ж. Баласагына, 2006, – серия 3, – вып. 3, – с. 15-18.
4. С.В. Пляцко, Т.Л. Петренко, С. Кадышев. Расчёт g - фактора парамагнитных дефектов в алмазе, кремнии и карбиде кремния. Вестник КНУ им. Ж. Баласагына, 2009, – серия 3, – вып. 4, – с. 44-46.
5. С.А. Альтшулер, Б.М. Козырев. Электронный парамагнитный резонанс соединений элементов промежуточных групп, М.: Наука, 1972, - 672с.
6. А. Абрагам, Б. Блини. Электронный парамагнитный резонанс переходных ионов, М.: Мир, 1972, т.1, - 651 с.
7. А.В. Двуреченский, Г.А. Качурин, Е.В. Нидаев, Л.С. Смирнов. Импульсный отжиг полупроводниковых материалов. М., Наука, 1974.
8. S.D.Darchuck, S.V.Panin, S.V. Plyatsko, F.F. Sizov, and E.B. Jakimov, J. Phys. Chem. Solids 51, 1333 (1990).
9. Ройцин А. Б., Пляцко С.В., Громовой Ю.С., Климов А.А., Кадышев С. Проявление механических напряжений в электронном парамагнитном резонансе гетеросистем на основе соединений $A^{IV}B^{VI}$, легированных примесью марганца. //Физика и техника полупроводников, 1992. – т.26. – вып.12. – с. 2091-2097.
10. Громовой Ю.С., Кадышев С.К., Пляцко С.В. Фотостимулированное изменение положения ионов Mn^{2+} в кристаллической решетке селенида свинца. //Физика и техника полупроводников, 1992, – т. 26, – вып.12, – с. 2098 - 2102.
11. Пляцко С.В., Громовой Ю.С., Кадышев С.К., Климов А.А. Преобразование собственных и примесных дефектов в селениде свинца и твердых растворах на его основе лазерным излучением. //Физика и техника полупроводников, 1994, – т. 28, – вып.12, – с. 138 - 143.
12. R. Breshi, A. Camanzi, V. Fano. J. Cryst. Growth, 58, 399 (1982).
13. Ш.М. Дугужев, В.А. Мошников. //Тезисы докладов VI Всесоюзной конференции по физико-химическим основам легирования полупроводниковых материалов. М.: 1988, – с.134-135.
14. S. Takaoka, K. Murase. Phys. Rev. B, v.20, 7, 2822-2833 (1979).

Рецензент: физика-математика илимдеринин кандидаты, улук илимий кызматкер Мамытбеков У.К.